

## Fabrication of a periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguide for a green laser generation

W.S. Yang<sup>\*,\*\*†</sup>, S.W. Kwon<sup>\*\*</sup>, M.K. Song<sup>\*\*\*\*</sup>, H.M. Lee<sup>\*</sup>, W.K. Kim<sup>\*</sup>, K.H. Koo<sup>\*\*\*</sup>, D.H. Yoon<sup>\*\*</sup> and H.Y. Lee<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Nano-Bio Photonics Team, Korea Electronics Technology Institute, Sungnam 463-816, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>\*\*\*</sup>COMMAX Co., Sungnam 462-121, Korea

<sup>\*\*\*\*</sup>Department of Materials Engineering, Korea Aerospace University, Goyang 412-791, Korea

(Received June 1, 2007)

(Accepted July 25, 2007)

**Abstract** Quasi-phase-matched (QPM) second harmonic generation (SHG) waveguide devices for a green light generation were fabricated by a periodically patterned electrode on the +Z crystal surface and homogeneous LiCl solution using a 5 mol% MgO doped congruent z-cut lithium niobate crystals. Using selective chemical etching, we confirmed the periodic (~6.8 μm) domain inverted structure and measured SHG properties of fabricated periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> ridge-type waveguides.

**Key words** Ridge-type waveguide, Periodic poling, Domain, MgO : LiNbO<sub>3</sub>

## 녹색 광 발진을 위한 주기적 분극 반전된 MgO : LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguide 제작

양우석<sup>\*,\*\*†</sup>, 권순우<sup>\*\*</sup>, 송명근<sup>\*\*\*\*</sup>, 이형만<sup>\*</sup>, 김우경<sup>\*</sup>, 구경환<sup>\*\*\*</sup>, 윤대호<sup>\*\*</sup>, 이한영<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>전자부품연구원 나노바이오포토닉스팀, 성남, 463-816

<sup>\*\*</sup>성균관대학교 신소재공학과, 수원, 440-746

<sup>\*\*\*</sup>(주)코맥스, 성남, 462-121

<sup>\*\*\*\*</sup>항공대학교 재료공학과, 고양, 412-791

(2007년 6월 1일 접수)

(2007년 7월 25일 심사완료)

**초 록** 녹색 광 발진을 위해 조화용융조성의 MgO가 첨가된 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 이용하여 준위상정합 2차 조화파 도파로 소자를 제작하였다. 도메인 반전을 위해 +Z면에 주기적인 전극 패턴을 형성하였으며, 외부전계의 균일한 인가를 위해 LiCl 전해 용액을 사용하여 도메인을 반전 시켰다. 선택적 화학식각을 통해, 약 6.8 μm의 분극 반전 주기를 확인 할 수 있었으며, 7 μm ridge 높이와 3 μm의 slap 높이를 갖는 폭 5 μm의 PPMgLN ridge-type 도파로 소자의 비선형 특성을 측정하였다.

### 1. 서 론

주기적 분극 반전된 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 이용한 준 위상정합 도파로 소자는 효과적이고 높은 파장변환 효율로 인해 가시 및 자외선영역의 광 발진 소자, 광통신 네트워크에서의 채널 변환기 등의 다양한 응용분야에 이용할 수 있다[1, 2]. 특히, 가시광선 영역에서 청색 광 발진의 경우 디스플레이 기술, 고해상도 프린팅, 바이오 기술 등

의 분야에서의 응용 가능성 때문에 많은 관심이 집중되고 있다[3].

준 위상정합 도파로 소자에서 높은 광 출력을 얻기 위해서는 도파로 내 진행 기본 파의 강한 광 가둠 효과, 기본 파와 2차 조화 파 모드간의 우수한 겹침 특성, 비선형 특성 감소의 억제, 광 굴절 손상에 대한 강한 억제력 등이 모두 만족 될 때 우수한 특성을 갖는 효과적인 소자의 제작이 가능하다[4].

일반적으로 도파로 제작을 위해서는 Ti 확산 법 과 양자 교환 법이 대표적이다. 전자의 경우 도파손실이 낮은 장점은 있지만 상대적으로 변환 효율이 낮으며, 후자의 경우 도파로 내 유동적인 양성자들 때문에 소자를 오랜

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-31-789-7395

Fax: +82-31-789-7399

E-mail: wsyang@keti.re.kr

시간 작동할 경우 비선형 특성 감소로 인해 소자 신뢰성이 떨어진다. 이러한 문제점들의 해결을 위해 광 굴절 손상에 대한 높은 억제 특성을 가지고 있는 zinc나 magnesium이 첨가된  $\text{LiNbO}_3$  결정을 이용한 ridge-type 도파로 소자에 대한 연구가 진행 되고 있다[5-7]. 대칭적인 모드 형상 및 계단형 굴절률 구조를 통해 광 가둠을 극대화 할 수 있는 ridge-type 도파로 소자의 경우 광 굴절 손상 억제효과와 이온 교환 및 확산에 의한 비선형 계수의 감소가 없어 높은 파장 변환 효율을 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 논문은 광 굴절 손상이 억제된 고출력 녹색 광 소자의 구현을 위해  $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$  결정을 이용하여 주기적으로 분극 반전된 ridge-type 도파로를 제작하였으며, 제작된 소자의 광학특성을 측정하였다.

2. 실험 방법

PPMgLN(Periodically poled  $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$ ) ridge-type 도파로 제작을 위해 두께 0.5 mm, z-축 방향의 5 mol%  $\text{MgO}$ 가 첨가된 조화용융조성의  $\text{LiNbO}_3$  결정을 이용하였으며, Fig. 1에 소자 제작을 위한 모식도를 나타내었다.

$\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$  기판은 세척 후 연마기를 이용하여 약 200  $\mu\text{m}$ 의 두께로 가공하였다. 이때 3인치 기판의 두께 편차는 약  $\pm 5 \mu\text{m}$ 이다. 가공된 기판은 결정 내 주기적 분극 반전을 시키기 위해 기판 표면에 감광제 도포 및 포토리소그래피 공정을 통하여 분극 반전을 위한 패턴을 형성하였으며, 오픈 영역의 폭은 1~1.4  $\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 2에 나타낸 것 과 같이 형성된 패턴의 오픈 영역은 LiCl 용액으로 채워졌으며, 진류와 전하의 제어 하에서 결정에 약 4.7 kV/mm 외부 전압을 인가해 줌으로써 결정 내에 주기적으로 도메인을 반전시켰으며, 반전 주기는 6.8  $\mu\text{m}$ 이다.

주기적 반전된 PPMgLN 기판을 두께 1 mm z-축  $\text{LiNbO}_3$  기판에 접합한 후 래핑 및 폴리싱 공정을 통하여 약 10  $\mu\text{m}$ 의 두께로 가공하였으며, 두께 편차는 약

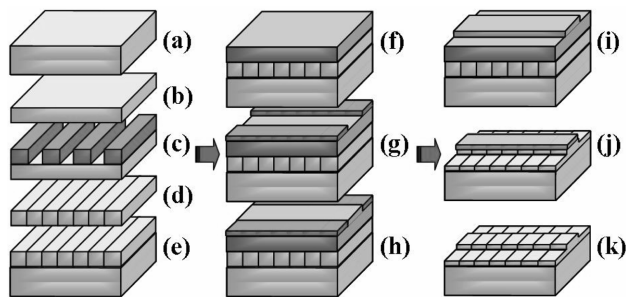


Fig. 1. QPM SHG device structure and fabrication sequence.

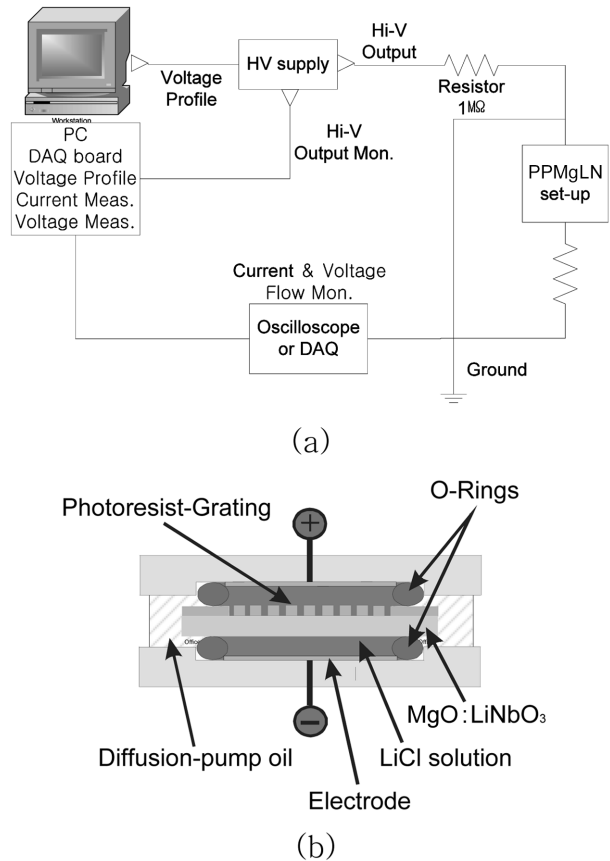


Fig. 2. External electric field poling system: (a) Circuit diagram, (b) Schematic diagram of the sample zig.

$\pm 0.5 \mu\text{m}$ 이다. 제작된 slap PPMgLN 도파로를 ridge 형태로 가공하기 위해 기판 위에 각각 3, 4, 5, 6  $\mu\text{m}$ 의 폭을 갖는 높이 3  $\mu\text{m}$ 의 패턴을 감광제를 이용하여 형성시켰으며, 패턴 형성 후 전기 도금을 통하여 약 2  $\mu\text{m}$  두께의 니켈 막을 성장시켰다. PPMgLN의 식각을 위해 기판 위에 형성된 감광제를 제거 하였으며, 반응성 식각 장비인 NLD(neutron loop discharge)를 이용하여 약 7  $\mu\text{m}$  두께의 깊이로 균일하게 식각 시켰다. 제작된 소자 입출력 단의 광 손실을 최소화 하기 위해 ridge 형태의 소자 양쪽 단면을 광학 연마함으로써 제작을 완료하였다.

외부 전압 인가를 통해 형성된 도메인 구조 확인을 위해 HF :  $\text{HNO}_3$  용액을 이용하여 약 15분 동안 선택적 화학 식각을 수행한 후 광학 현미경을 이용하여 주기적으로 반전된 분극의 균일성 및 duty cycle을 확인하였다. 소자에 입사되는 입력 광의 모드 사이즈와 PPMgLN 소자 간의 모드 매칭 정도를 확인해 보기 위해 다양한 ridge 형태에 따른 광의 모드 사이즈를 FEMLAB을 통하여 simulation하였다. 또한, 최종적으로 제작된 소자의 형태를 scanning electron microscopy(SEM)을 통하여 관찰 하였으며, 1064 nm 입사 광에 대한 소자의 second harmonic generation(SHG)특성을 측정하였다.

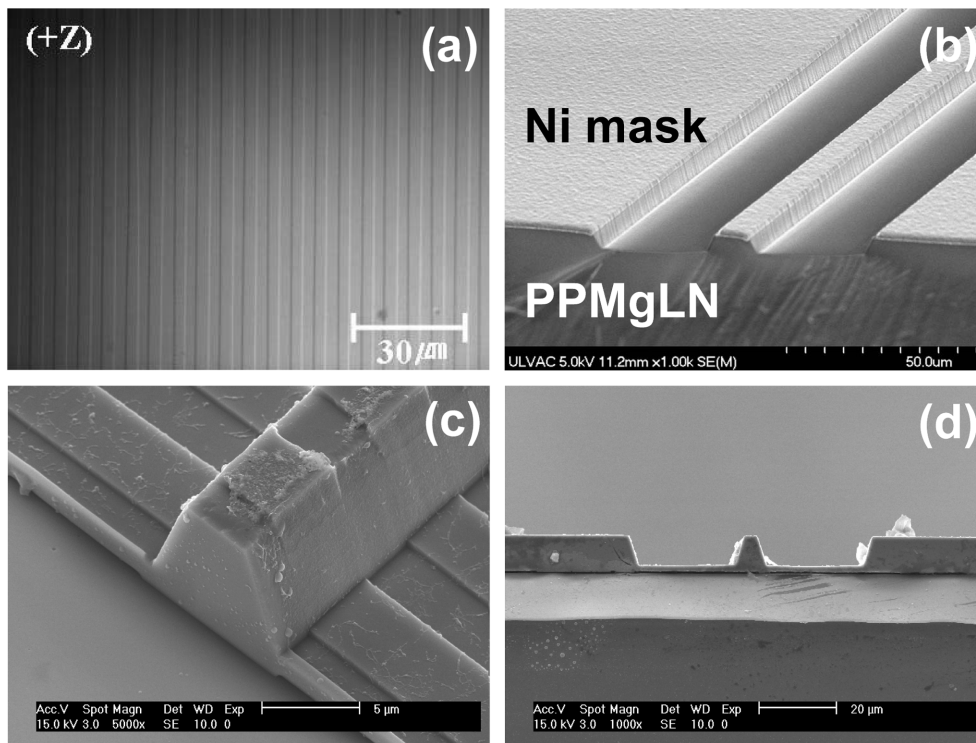


Fig. 3. Photographs of periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> ridge-type waveguide process result: (a) etched +z face, (b) plasma etched face, (c) edge face after side optical polishing and chemical etching, (d) cross section of ridge-type waveguide.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3에 PPMgLN ridge-type 도파로 제작 과정에서 측정된 결과를 나타내었다. 외부 전압 인가를 통해 6.8  $\mu\text{m}$  주기로 분극 반전된 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 결정의 도메인 반전영역(Fig. 3(a))은 전체적으로 매우 균일했으며 duty cycle 은 47~53 %로 나타났다. 일반적으로 분극 반전을 위한 전하량은 자발분극(spontaneous polarization) 과 분극 영역과의 관계이며,  $Q = 2P_s A$ 로 표현된다. 이때,  $Q$  는 전하량,  $P_s$  는 자발분극,  $A$  는 분극반전 영역이다. 조화 용융조성의 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 결정의 강제전압(coercive field)은 약  $\sim 6 \text{ kV/mm}$ 의 값을 갖는다. 따라서, 분극반전을 위한 강제전압 하에서 전하량을 제어함으로써 분극 반전영역의 비율 제어가 가능하다. 특히, 결정에 인가되는 외부 전압의 균일성, 감광제 패턴 오픈 영역의 측면 균일성, 전압이 인가되는 결정 표면에서의 균일한 도메인 핵 생성, 생성된 도메인 핵들의 성장 메커니즘을 통한 속도 제어 등의 조건이 만족 될 때 균일한 주기의 도메인 반전 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 3(b)에 PPMgLN 결정을 약 10  $\mu\text{m}$  두께로 래핑 및 폴리싱 공정을 통하여 가공한 후 ridge 형태로 식각한 결과를 나타내었다. 식각에 이용된 장비의 특징은 NL(neutral loop) 형태로 형성되는 플라즈마의 반경을 중앙코일의 전류로써 조절해 줌으로써 식각의 균일성을

얻을 수 있으며, 저온 전자(Te)를 갖는 고밀도 플라즈마를 생성하여 낮은 압력 하에서 식각공정이 진행됨으로써 평탄한 식각 면과 빠른 식각율을 얻을 수 있다는 것이다. PPMgLN 식각을 위해서는 이러한 고밀도 플라즈마 상태에서도 패턴을 보호할 수 있으며, 또한 선택비가 우수한 소재를 마스크로 선택하여야 함으로, 본 연구에서는 니켈을 사용하였다. 식각 공정을 위한 조건은 반응실 압력을 0.33 pa로 고정하였으며, Ar/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> = 85/15, 안테나 파워 600 W, 바이어스 파워 300 W이며, 식각 시간은 80분이다. 식각 깊이는 7  $\mu\text{m}$ 로 식각 율은 약 0.09  $\mu\text{m}/\text{min}$  이었으며, 벽면의 각도는 약 75도이다. 식각된 표면은 매우 깨끗했으며, 니켈 마스크의 측면 형상이 PPMgLN 결정의 식각 측면 거칠기에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 3(c)와 3(d)는 PPMgLN ridge 도파로의 단면을 광학 연마한 후 HF : HNO<sub>3</sub> 용액에서 약 15분 선택적 식각을 수행한 후 관찰한 결과이다. 주기적 분극 반전 영역은 10  $\mu\text{m}$  두께 가공 및 건식 식각 등의 ridge 제작 과정에서 발생하는 열과 stress 및 strain에도 영향을 받지 않고 분극 상태가 유지되고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 최종적으로 각각 3, 4, 5, 6  $\mu\text{m}$ 의 폭을 갖는 깊이 7  $\mu\text{m}$ , 측면 각도 약 75도, slap의 높이 3  $\mu\text{m}$ , PPMgLN과 더미 기판인 LiNbO<sub>3</sub> 결정과의 계면간의 거리 0.5  $\mu\text{m}$ 의 구조를 갖는 소자가 제작 되었다.

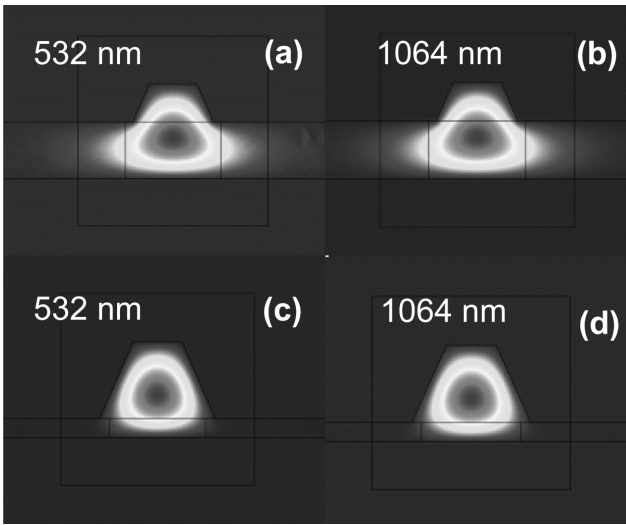


Fig. 4. Mode size simulation results of PPMgLN ridge-type waveguide at 532 and 1064 nm.

Fig. 4에 PPMgLN ridge 도파로의 다양한 구조에 따른 1064 nm와 532 nm 광에 대한 모드사이즈를 FEM-LAB를 이용하여 simulation한 결과를 나타내었다.

PPMgLN ridge 도파로 설계에서 고려된 사항으로는 첫 번째 1064 nm 모드와 532 nm 모드 간의 차이가 발생할 경우 2차 조화파에서 효율 저하가 예상됨으로 도파로의 1064 nm와 532 nm 모드 사이즈가 동일해야 한다는 것, 두 번째로는 입력 단의 1064 nm fiber의 모드는 구형이므로 도파로의 모드도 구형이어야 한다는 것, 마지막으로 같은 광 파워가 전달될 때, 모드 사이즈가 작으면 단위면적당 광 파워가 커져 2차 조화파 효율이 향상됨으로 모드 사이즈는 최대한 작은 사이즈가 되도록 해야 한다는 것이다. 설계 변수는 PPMgLN 기판 높이 10  $\mu\text{m}$ , ridge 도파로 깊이는 각각 4, 8  $\mu\text{m}$ 이며, 폭과 측면 각도는 5  $\mu\text{m}$ , 70도로 고정하였다.

Fig. 4(a)와 4(b)에서 보이는 것과 같이 식각 깊이가 낮은 도파로의 경우 532 nm 광에 대해 모드 사이즈는 수직방향으로 7.4  $\mu\text{m}$ , 수평방향으로는 ridge 부분이 9  $\mu\text{m}$ , slab 부분이 12.6  $\mu\text{m}$ 의 크기였다. 1064 nm의 광에 대해서는 수직방향으로 7.5  $\mu\text{m}$ , 수평방향으로는 ridge 부분이 8.8  $\mu\text{m}$ , slab 부분이 12.5  $\mu\text{m}$ 의 크기를 나타내었다. 같은 조건에서 ridge의 식각 깊이를 8  $\mu\text{m}$ 로 했을 경우(Fig. 4(c)와 4(d))는 532 nm 광에 대한 모드 사이즈는 수직방향으로 7.5  $\mu\text{m}$ , 수평방향으로는 ridge 부분이 7.2  $\mu\text{m}$ , slab 부분이 8  $\mu\text{m}$ 의 크기였다. 1064 nm의 광에 대해서는 수직방향으로 7.6  $\mu\text{m}$ , 수평방향으로는 ridge 부분이 7  $\mu\text{m}$ , slab 부분이 8.2  $\mu\text{m}$ 의 크기를 나타내었다. 따라서, 10  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 PPMgLN 기판에서의 ridge 도파로 제작은 ridge의 높이가 증가할수록 구형에 가까운 모드 크기를 얻을 수 있음을 확인 할 수 있었다.

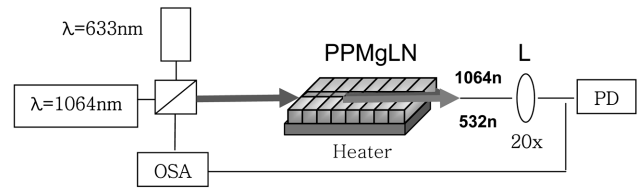


Fig. 5. Schematic of the experimental set-up used for SHG.

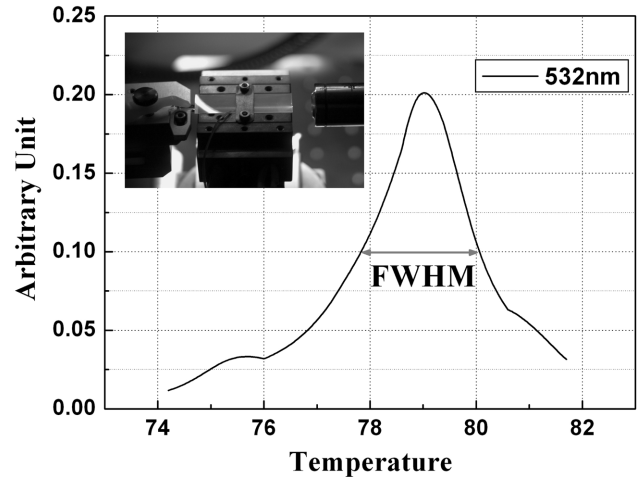


Fig. 6. SHG curve of the PPMgLN ridge-type waveguide device.

Fig. 5에 제작된 PPMgLN ridge 도파로 소자의 2차 조화파 특성 측정을 위한 측정 기구 모식도를 나타내었다.

1064 nm laser diode(LD)를 통하여 나오는 광을 소자에 입사시켰으며 소자를 통해 나오는 출력은 20 $\times$  렌즈와 532 nm에서 높은 반사율을 갖는 반사 거울 2개를 이용하여 1064 nm와 532 nm PD로 각각 광을 집속 시켜 측정하였다.

Fig. 6에서 보이는 것과 같이 히터를 이용하여 소자의 온도에 따른 파장변환 특성을 확인한 결과 약 79도에서 532 nm의 광 출력이 가장 강하게 나타났으며, 온도에 따른 FWHM(full width half maximum)은 약 2.2도임을 확인하였다. 제작된 PPMgLN ridge 도파로 소자가 갖는 6.8  $\mu\text{m}$  주기의 변화 및 소자의 정밀한 가공을 통해 상온 근처에서 높은 변환 효율을 갖는 소자 제작이 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

5mol% MgO 첨가된 조화용융조성의 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 이용하여 6.8  $\mu\text{m}$  주기의 PPMgLN ridge 도파로 소자 제작 및 특성을 분석하였다. 설계를 바탕으로 하여 깊이 7  $\mu\text{m}$ , 폭 5  $\mu\text{m}$ , slap 높이 3  $\mu\text{m}$ 의 구조를 갖는 소자에

서 532 nm의 녹색 광을 79도의 온도에서 발진 시킬 수 있었다. 이러한 문제점은 구조적 정밀성을 보완하여 광이 느끼는 굴절률의 변화를 최적화 시킨다면 상온에서의 고 출력 광원의 발진이 가능할 것으로 생각된다. 또한 본 기술을 이용한 녹색 광 발진의 경우 신뢰성 있는 안정된 광의 발진이 가능하므로 바로 시장에 접목시킬 수 있는 유망한 기술로 보인다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] L.E. Myers and W.R. Bosenberg, "Periodically poled lithium niobate and quasi-phase-matched optical parametric oscillators", IEEE J. Quantum. Electron. 33 (1997) 1663.
- [ 2 ] Y. Zhu and N. Ming, "Second-harmonic generation in a Fibonacci optical superlattice and the dispersive effect of the refractive index", Phys. Rev. B 42 (1990) 3676.
- [ 3 ] S. Kurimura, Y. Kato, M. Maruyama, Y. Usui and H. Nakajima, "Quasi-phase-matched adhered ridge waveguide in LiNbO<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 191123.
- [ 4 ] M. Iwai, T. Yoshino, S. Yamaguchi, M. Imaeda, N. Pavel, I. Shoji and T. Taira, "High-power blue generation from a periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub> ridge-type waveguide by frequency double of a diode end-pumped Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser", Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 3659.
- [ 5 ] Y. Chen, J. Guo, X. Liu, C. Lou, J. Yuan, Y. Luo, J. Xu and S. Chen, "Highly efficient blue light of femtosecond pulses by second-harmonic generation in periodically poled MgO : LiNbO<sub>3</sub>", Opt. Comm. 238 (2004) 201.
- [ 6 ] Y.J. Lai, J.C. Chen and K.C. Liao, "Investigations of ferroelectric domain structures in the MgO : LiNbO<sub>3</sub> fibers by LHPG", J. of Crystal Growth 198 (1999) 531.
- [ 7 ] B.M. Jin, I.W. Kim, W.B. White and A.S. Bhalla, "Modification of UV-VIS optical absorption properties caused by MgO incorporation in MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals", Materials Lett. 30 (1997) 385.